

DISEÑO Y ANÁLISIS DE FILTROS PASIVOS DE PRIMER Y SEGUNDO ORDEN PARA ATENUACIÓN DE ARMÓNICOS EN RED DE DISTRIBUCIÓN

Design and analysis of first and second order passive filters for harmonic attenuation in distribution networks

Presentación: 13 y 14 de septiembre de 2023

Ulises Manassero

Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Fe - Centro de I+D en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE) - Argentina
umanassero@frsf.utn.edu.ar

Andrés Zottico

Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Fe – Laboratorio de Máquinas y Medidas Eléctricas (LAMyME) - Argentina
azottico@frsf.utn.edu.ar

Emmanuel Sangoi

Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Fe - Centro de I+D en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE) - Argentina
esangoi@frsf.utn.edu.ar

Diego López

Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Fe - Centro de I+D en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE) - Argentina
dclopez@frsf.utn.edu.ar

Pablo Marelli

Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Fe - Centro de I+D en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE) - Argentina
pamarelli@frsf.utn.edu.ar

Irene Steinmann

Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Fe - Centro de I+D en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE) - Argentina
isteinma@frsf.utn.edu.ar

Resumen

La polución armónica en una red de distribución genera una serie de afectaciones tales como variación del factor de potencia, pérdidas eléctricas adicionales y condiciones de resonancia, las cuales hacen que el sistema sea inestable y trabaje de forma inadecuada. Este trabajo presenta un diseño de filtros pasivos de armónicos de primer y segundo orden utilizando algoritmos desarrollados en Matlab, y la posterior implementación en una red de

distribución de media tensión estándar, modelada en software específico de sistemas de potencia. Se analiza un caso particular con existencia de banco de capacitores shunt para compensación de factor de potencia. Los resultados demuestran una atenuación notable del filtro de primer orden, para los armónicos de orden 5 y 7, que resultan ser los más importantes en la red de estudio. En menor medida, los filtros de segundo orden logran una atenuación moderada.

Palabras clave: distorsión armónica, filtro pasivo, atenuación

Abstract

Harmonic pollution in a distribution network generates a series of affectations such as power factor variation, additional electrical losses and resonance conditions, which make the system unstable and work inadequately. This work presents a design of first and second order passive harmonic filters using algorithms developed in Matlab and the subsequent implementation in a standard medium voltage distribution network, modelled in specific power system software. A particular case is analysed with the existence of a shunt capacitor bank for power factor compensation. The results show a notable attenuation of the first order filter for harmonics of order 5 and 7, which are the most important in the network under study. To a lesser extent, the second order filters achieve moderate attenuation.

Keywords: harmonic distortion, passive filtering, attenuation

Introducción

Los armónicos eléctricos son perturbaciones que se presentan en la onda de corriente y voltaje, producidas por cargas no lineales; estas perturbaciones son múltiplos de la frecuencia fundamental y representan uno de los índices de calidad de energía más importantes en un sistema de potencia. El efecto de las corrientes armónicas provoca pérdidas eléctricas adicionales en líneas y transformadores del sistema de distribución y amplificación de la corriente de compensación reactiva (Baitha y Gupta, 2015). En sistemas de distribución, puede producirse resonancia paralelo por compensación reactiva mediante capacitores shunt instalados para mejorar el factor de potencia, donde influye la corriente armónica de los sistemas de distribución.

Para limitar y mitigar las corrientes armónicas, la norma IEEE 519-1992 (IEEE, 1992) recomienda el uso de filtros pasivos y activos (Panmala y Sriyanyong, 2019). Mientras que los filtros pasivos proporcionan un circuito de baja impedancia para absorber las corrientes armónicas (Awadalla et al, 2015), los filtros activos compensan los componentes armónicos para purificar las corrientes carga (Chamchoy, 2014). Sin embargo, los filtros pasivos suelen ser de mayor aplicación debido a su bajo costo. Los capacitores de filtros pasivos también proporcionan compensación de potencia reactiva, donde para evitar condiciones de resonancia que amplifiquen la corriente se agrega un filtro de desintonización.

En este contexto, en el trabajo propuesto se evalúa el diseño, modelado y análisis de impacto de filtros pasivos de primer orden (sintonización simple) y de segundo orden (pasa alto amortiguado) con el objetivo de lograr una mitigación efectiva de los niveles de armónicos estimados en nodos de baja y media tensión de una red de distribución estándar, conformada por demandas particulares, relacionadas a usuarios residenciales y comerciales con una matriz energética netamente eléctrica (sin uso de gas natural).

Desarrollo

Descripción de la Red

La red de estudio se conforma por una estación de rebaje (ER), con dos transformadores 33/13,2 kV, y dos salidas de distribución primaria de 13,2 kV. El estudio se focaliza en el alimentador que abastece cinco subestaciones transformadoras aéreas (SETA) de 13,2/0,4 kV, en zona urbana. En este sentido, el otro alimentador se ha modelado como carga concentrada. Cada una de las barras de baja tensión de las SETAs, posee tres alimentadores secundarios. A continuación, en la Figura 1 se muestra el modelo de red de estudio en el software ETAP.

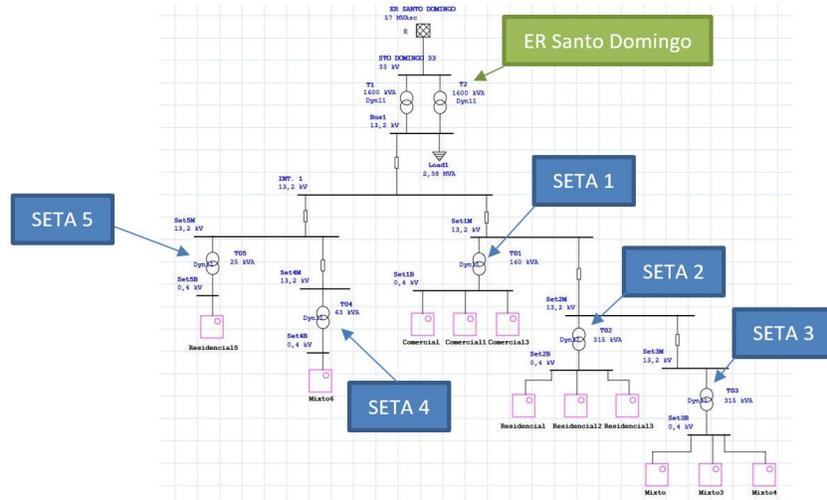


Figura 1. Modelo eléctrica del sistema de distribución en estudio.

Metodología

En la Figura 2 se presenta el flujograma de actividades que conforman la metodología propuesta para el modelado y simulación de filtros de primer y segundo orden, y la posterior verificación de la atenuación de determinados ordenes de armónicos en barras de media tensión de la red de estudio.

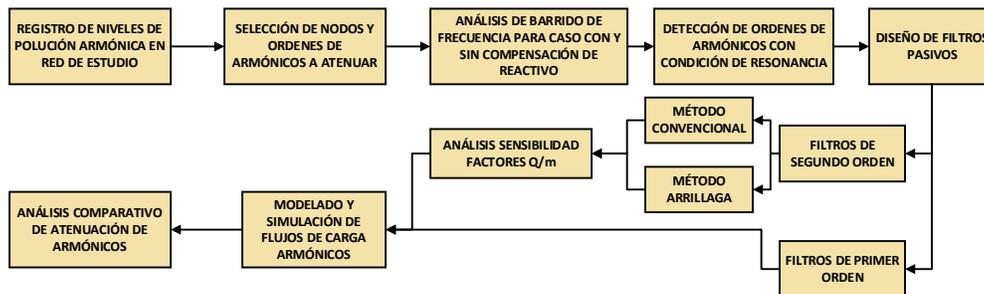


Figura 2. Metodología implementada para el presente trabajo.

Niveles armónicos de base en la red de estudio

La evaluación de los niveles de armónico de tensión ha sido realizada de acuerdo a la normativa del Ente Nacional Regulador de Energía (ENRE) según Resolución N° 184/2000 (ENRE, 2000).

En trabajos anteriores, los autores han realizado las simulaciones de flujos de cargas armónicas sobre la red de estudio (Manassero et al, 2022) para diferentes escenarios de demanda, donde se advierte que todos los nodos verifican los niveles admitidos por la normativa. No obstante, a los fines de evaluar la implementación de filtros, se

adoptan como nodos de referencia las barras de 13,2 y 33 kV de la ER, en particular los órdenes de armónicos más altos, correspondientes al 5 y 7 (ver Figura 3).

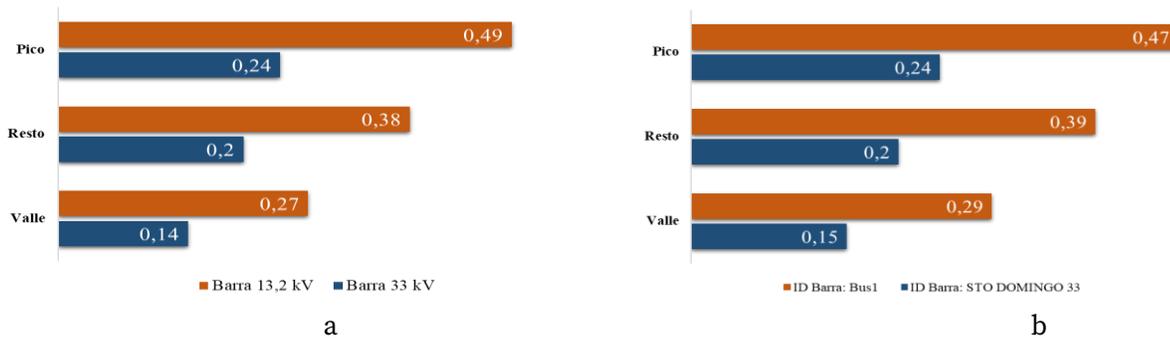


Figura 3. Nivel porcentual de armónicos de tensión en barras de 13,2 y 33 kV de ER Santo Domingo. A) armónico de orden 5; b) armónico de orden 7.

Estudio de Respuesta en Frecuencia de red Base con y sin compensación de reactivo

El análisis de barrido en frecuencia es una herramienta que permite detectar cuál es el orden armónico que puede provocar resonancia paralela o serie por modificación en la impedancia característica del sistema. Para este estudio se realiza una comparación de la red con compensación de potencia reactiva y sin compensación (ver Figura 4), porque en esta condición normalmente se incrementan las probabilidades de resonancia en la red. Para esta simulación, se considera una potencia de compensación de reactivo de un tercio de la potencia de la ER, según recomendación del fabricante de transformador. En este caso, la potencia de la ER es de 3200 kVA y la potencia de compensación adoptada de 1000 kVAR.

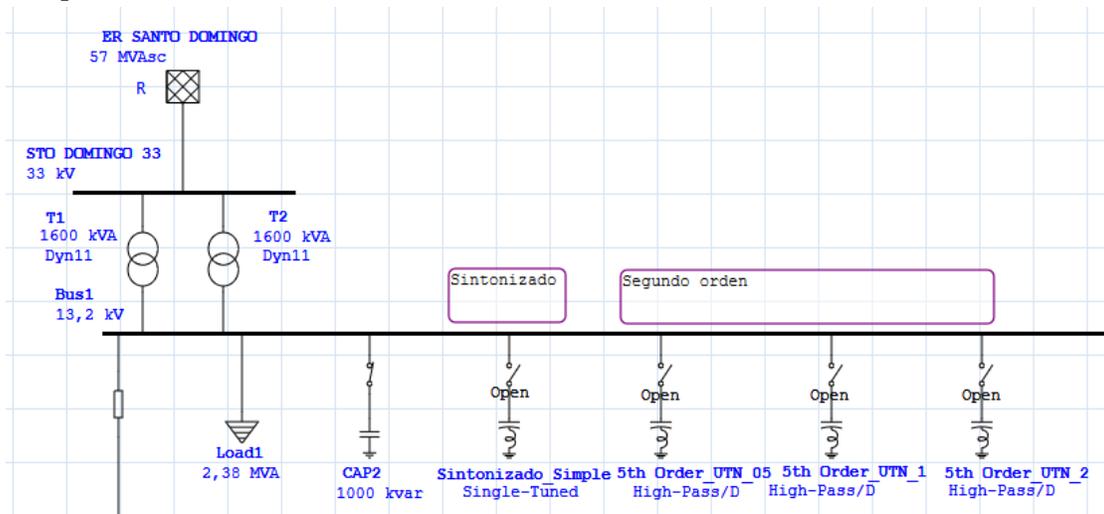


Figura 4. Modelo de ER Santo Domingo con compensación de reactivo y filtros de primer y segundo nivel.

En la Figura 5 se observa que la presencia de la compensación reactiva provoca una resonancia paralela cercana a la componente fundamental. Esto permite suponer que, si existe polución armónica de baja frecuencia en la barra de 13,2 kV del sistema, es probable que este fenómeno provoque sobretensiones. Además, puede provocar daños por sobrecarga en los capacitores conectados en el punto de acople común. La frecuencia de resonancia en la barra de 13,2 kV con compensación armónica es la correspondiente a los órdenes 5, 6 y 7.

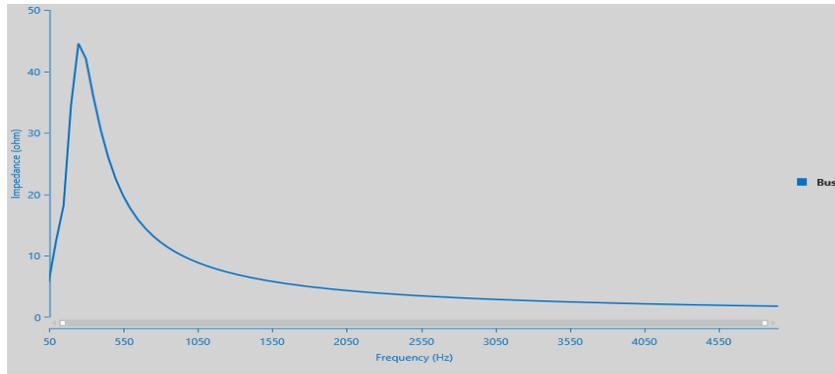


Figura 5. Respuesta en frecuencia barra de 13,2 kV con compensación de la ER Santo Domingo.

Resultados

Diseño de filtros de primer orden

La ecuación (1), describe el comportamiento del filtro. La magnitud de esta impedancia debe ser lo menor posible para el armónico a eliminar y lo mayor posible en la frecuencia fundamental.

$$Z = R + j(X_L - X_C) \quad (1)$$

En base al estudio de barrido de frecuencia, se busca atenuar el armónico de orden 5, de modo tal que para un banco compensador de reactivo de 1000 kVAr, la componente capacitiva del filtro es de 330 kVAr por fase.

Mediante el uso de la herramienta de Matlab, MuPad se grafican las magnitudes obtenidas con la ecuación (1) en función del orden de armónico. En la Figura 6a se observa que la impedancia característica, posee un mínimo en el quinto orden. En la Figura 6b se observan las magnitudes alcanzadas de distorsión armónica global de tensión (THDv) en barra de 33 kV, donde se destaca que el armónico de orden 5 se ha reducido a un 2% de su valor respecto al escenario sin filtro, mientras que el armónico de orden 7 se redujo a un 45% de su valor inicial.

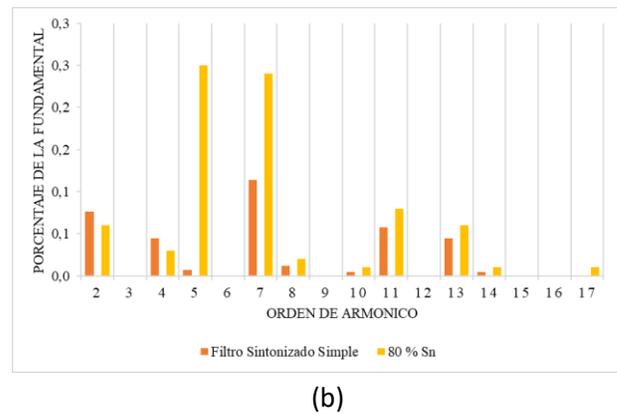
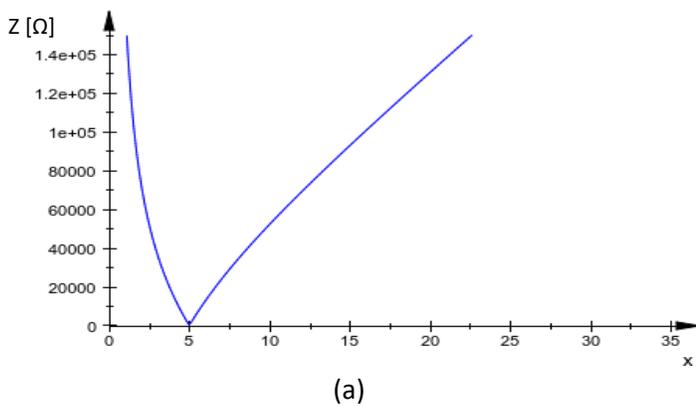


Figura 6. Resultados aplicación filtro de primer orden. (a) Respuesta en frecuencia. (b) Resultados de la mitigación.

Diseño de filtros de segundo orden

En la Figura 7 se expone la comparación de las componentes armónicas de tensión entre el modelo en escenario de pico sin filtro y el modelo en escenario de pico con filtro, donde se aprecia la disminución de los armónicos de orden subsecuentes al 5. Además, el THDv disminuye de 0,37% a 0,198%, conforme se incrementa la calidad del filtro. Es decir, el valor de THDv disminuye un 8% con la calidad más baja, un 30% con la calidad intermedia y un 47 % con la calidad más alta, con un consumo de 14,5, 8,23 y 4,33 kW respectivamente.

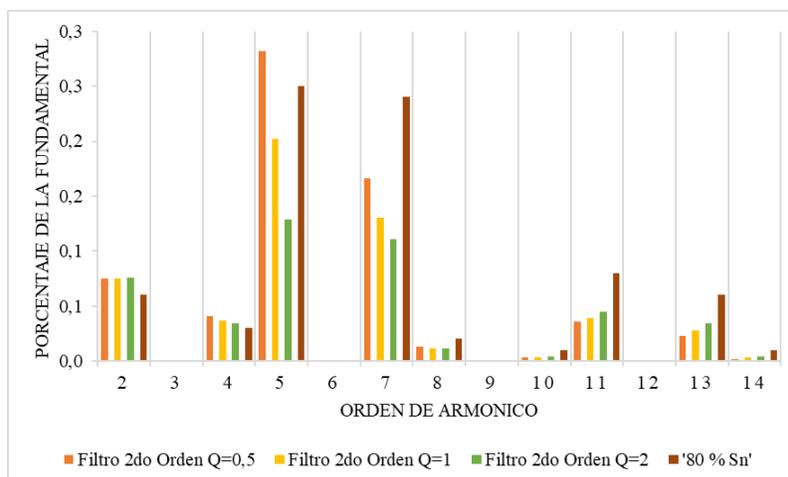


Figura 7. THDv de barra de 33 kV - Comparativa de red con filtro de 2do Orden en 13,2 kV vs Sin Filtro.

Conclusiones

Realizando una comparación entre los tres métodos aplicados, los cuales han sido orientados a reducir fundamentalmente los armónicos de orden 5 y 7 debido a su preponderancia en comparación al resto, el método con mayor eficacia ha sido el filtro de primer orden. Esto puede atribuirse a que, en esta red en particular, los armónicos de orden superior son reducidos, y por tanto los filtros de segundo orden tienen la ventaja de filtrar armónicos por encima de uno individual, no siendo muy efectivos para mitigar un armónico en particular.

Referencias

- Awadalla, M.; Omer, M. y Mohamed, A. (2015). "Single-tuned filter design for harmonic mitigation and optimization with capacitor banks". International Conference on Computing, Control, Networking, Electronics and Embedded Systems Engineering (ICCNEEE), pp. 242-247.
- Baitha, A.; Gupta, N. (2015). "A comparative analysis of passive filters for power quality improvement". International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy), pp. 327-332.
- Chamchoy, C. (2014). "Harmonic Solution with Harmonic Detuned Filters". Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering Chulalongkorn University.
- Ente Nacional Regulador de la Energía (ENRE). (2000). "Resolución 184/2000: Base Metodológica para el Control de la Calidad del Producto Técnico. Etapa 2".
- IEEE (1992). "IEEE Std. 519-1992: Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems". New York, 1993.
- Manassero, U; Zóttico, A.; Torres, J. L. (2022). "Modelado y evaluación de espectro armónico en diferentes tipos de usuarios. análisis de su impacto global en una red de distribución". Jornadas de Ciencia y Tecnología de la UTN, Facultad Regional San Francisco.
- Panmala, N.; Sriyanyong, P. (2019). "Design and Implementation of Passive Harmonic Filter Using Simulation Tool". Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C), Bangkok, Thailand, pp. 1-5.